

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

СОБСТВЕННЫЕ ФАЗОВЫЕ ШУМЫ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

Исследованы собственные шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов. Проведен анализ выражений для спектральной плотности мощности естественных и фликкер-шумов.

Ключевые слова: ЦСС, спектральная плотность мощности, фазовые шумы.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций. Цифровые вычислительные синтезаторы сигналов (ЦСС) широко применяются в различной радиоаппаратуре благодаря ряду достоинств: высокому разрешению по частоте и фазе, цифровому управлению частотой и фазой выходного сигнала, высокому быстродействию. Появление дешевых микросхем полных ЦСС и удобных средств разработки делает их сегодня привлекательными для различных сфер применения.

К недостаткам ЦСС можно отнести высокий уровень дискретных спектральных составляющих, который постоянно уменьшается с повышением разрядности используемых цифровых устройств.

Важным параметром ЦСС является уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов. СПМ фазовых шумов выходного сигнала ЦСС можно представить суммой трех составляющих: шумами источника тактового сигнала с учетом коэффициента передачи ЦСС, шумами квантования и собственными шумами элементов синтезатора [1]. Для СПМ шумов квантования в [2] получено удобное общее выражение, не противоречащее приведенному в [3].

При малой разрядности ЦАП ($N = 8 - 10$) собственные шумы ЦСС существенно меньше шумов квантования, поэтому в ранних публикациях учитывали только шумы квантования [4, 5]. Однако в связи с совершенствованием технологий и появлением новой элементной базы, а также увеличением разрядности ЦАП до 14, тактовые частоты повысились до 1 ГГц, вследствие чего шумы квантования значительно уменьшились и уровень шумов ЦСС определяется «остаточным шумом», обусловленным как раз собственными шумами ЦСС.

Целью статьи является исследование собственных шумов различных ЦСС и получение закономерностей для получения выражения СПМ.

Основной материал

Спектральную плотность мощности собственных фазовых шумов ЦСС предлагается представ-

лять как сумму составляющих, вызванных естественной (тепловой) составляющей и фазовым фликкер-шумом ($1/f$ шумом) [6, 7]:

$$S_{\text{ЦСС}} = S_{\text{ост}} + S_{\text{флик}}.$$

Прежде всего, количественные уровни естественных шумов ЦСС в основном определяются типом логических элементов, используемых в ЦАП. Так, в работе [4] СПМ указывается на величину -160 дБ/Гц, в [5] -130 дБ/Гц при отстройке от несущей 1кГц. Близкие значения уровней СПМ фазового шума (-165 дБ/Гц) получены в [8, 9].

Теоретические оценки собственных шумов ЦСС приведены в [6, 7, 9].

Для начала воспользуемся полученным в [7] выражением для оценки естественных фазовых шумов ЦСС, вызываемых в основном ЦАП, которое позволяет рассчитать значение СПМ шума для ЦАП при определенных параметрах

$$S_{\text{ест}} = \frac{(\pi k/K)^2}{\left(\sin(\pi k/K)\right)^2} S_1 + \frac{(\pi k/K)^2 \left[3 - \frac{\sin(2\pi k/K)}{2(2\pi k/K)} \right]}{\left(\sin(\pi k/K)\right)^2} S_2 + S_3, \quad (1)$$

где k – код, устанавливающий частоту, $K = 2^N$ – емкость вычислителя кодов фазы (ВКФ), N – количество разрядов ВКФ, $k/K = f_{\text{out}}/f_T = K_{\text{ЦСС}}$ – коэффициент передачи ЦСС, f_{out} и f_T – выходная и тактовая частоты ЦСС, S_1 , S_2 , S_3 – спектральные плотности мощности шумов эквивалентных источников шума, величины которых определяются элементной базой ЦАП и параметрами входящих в него элементов.

Для конкретного примера ЦАП на ЭСЛ типа К1118ПА1 (К1118ПА3), подставив данные из [7], получаем значения СПМ шумов:

$$S_1 = 10^{-17,4} \text{ 1/Гц}, \quad S_2 = 10^{-17,2} \text{ 1/Гц},$$

$$S_3 = 10^{-18,1} \text{ 1/Гц}.$$

Рассчитаем зависимости СПМ естественного шума по (1) для ЦСС выполненных на дискретных цифровых элементах ЭСЛ логики, которые имеют в своем составе ЦАП К1118ПА1 или К1118ПА3. Зависимости СПМ фазового шума для ЦСС с ЦАП типа К1118ПА1 или К1118ПА3 приведены на рис.1.

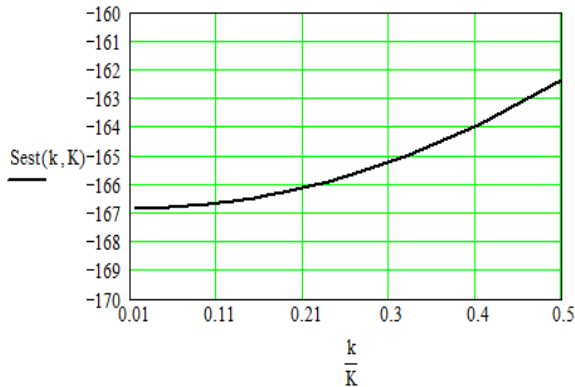


Рис. 1. СПМ естественного фазового шума ЦАП К1118ПА1

Из зависимости рис.1 следует, что величина СПМ шума ЦАП составляет -162...-167дБ/Гц и совпадает с оценками, приведенными выше.

Преобразуя выражение (1) к виду

$$S_{ест} = \frac{(\pi f_{out}/f_T)^2}{(\sin(\pi f_{out}/f_T))^2} S_1 + \frac{(\pi f_{out}/f_T)^2 \left[3 - \frac{\sin(2\pi f_{out}/f_T)}{2(2\pi f_{out}/f_T)} \right]}{(\sin(\pi f_{out}/f_T))^2} S_2 + S_3,$$

видим, что естественный шум на выходе ЦАП имеет две составляющие: первая изменяется обратно пропорционально квадрату коэффициента передачи ЦАП

$$K_{ЦАП} = \sin\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right) / \left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right),$$

вторая определяется шумами нагрузки и является величиной постоянной.

Для оценки фликкер-шумов в [6] предложено приближенное выражение для односторонней СПМ шумов ЦАП К1118ПА3

$$S_{кул}(F) = 2k^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-17} \left(\frac{F_N}{F}\right)^{1,5},$$

где $F_N = 10\text{Гц}$ выбрана как опорная частота.

Постоянная величина C (в данном случае $C = 2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-17} \times 10^{1,5}$) определяется параметрами конкретного ЦАП. Это выражение получено для $K = 32$. После выделения из него соотношения k/K и преобразования с учетом $K = 2^N$ и $k/K = f_{out}/f_T$ получим общее выражение для СПМ фликкер-шума произвольного ЦАП

$$S_{кул}(F) = \left(\frac{k}{K}\right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F^{1,5}} = \left(\frac{f_{out}}{f_T}\right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F^{1,5}}. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что уровень фликкер-шумов пропорционален квадрату коэффициента передачи ЦСС $K_{ЦСС}^2 = (f_{out}/f_T)^2$ и величине разрядности вычислителя кодов фазы N . С помощью этого соотношения можно определить уровень фликкер-шума для любых выходной и тактовой частот.

В других источниках в качестве выражения для СПМ фликкер-шума используются выражения для СПМ шума цифрового делителя частоты

$$S_{кр1}(F) = \frac{10^{-14,7}}{F} \quad [8], \quad S_{кр2}(F) = 10^{-10 \pm 2} \quad [10],$$

но более близким является соотношение для делителя частоты с учетом значения выходной частоты [8]

$$S_{кр}(F) = \frac{10^{-14 \pm 1} + 10^{-27 \pm 1} \cdot f_{out}^2}{F}. \quad (3)$$

Для построения и сравнения СПМ шумов по выражениям (2) и (3) для конкретного ЦСС воспользуемся экспериментальными СПМ шума интегрального синтезатора, например, AD9911 [3].

В этом ЦСС количество разрядов ВКФ составляет $N = 32$, тактовая частота $f_T = 500\text{МГц}$.

Для случая $F = 10\text{Гц}$ значение СПМ фазовых шумов составляет -129дБ/Гц . Подставляя эти данные в (2), определяем постоянную $C = 2 \cdot 10^{-28}$.

Для ЦСС AD9911 СПМ фликкер-шума хорошо аппроксимируется соотношением (3) со следующими коэффициентами

$$S_{кр}(F) = \frac{10^{-13} + 10^{-26,5} \cdot f_{out}^2}{F}. \quad (4)$$

На рис. 2 и 3 приведены зависимости СПМ фликкер-шумов, рассчитанные по формулам (2) и (4), а также экспериментальные СПМ синтезатора AD9911 для двух значений выходных частот ЦСС.

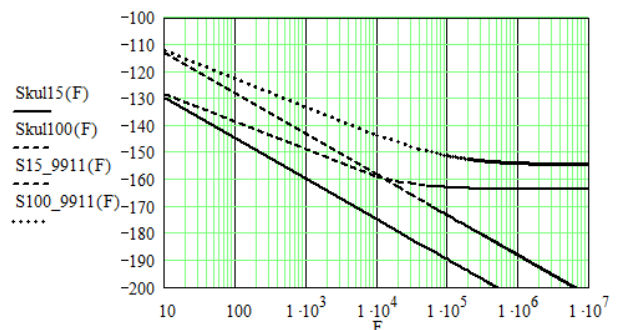


Рис. 2. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (пунктирная), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (2) (прямые линии)

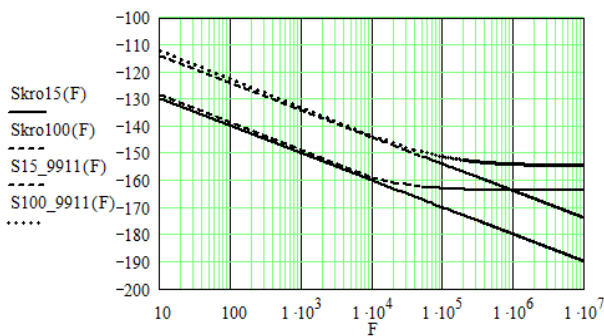


Рис. 3. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (пунктирная), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (4) (прямые линии)

Анализ построенных зависимостей показывает, что экспериментальная СПМ в области фликкер-шумов наиболее точно аппроксимируется выражением (4) рис.3, немного отклоняясь при малых частотах отстройки 30 – 50 Гц. Поэтому при аппроксимации СПМ шумов ЦСС вычислительного типа необходимо учитывать фазовый фликкер-шум, СПМ которого пропорциональна $1/F$ и белый шум, СПМ которого пропорциональна $1/F^2$.

При использовании в (2) показателя степени частоты F , равного 1, получаем выражение

$$S_{kul}(F) = \left(\frac{f_{out}}{f_T} \right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F}, \quad (5)$$

по которому построенные СПМ фликкер-шума совпадают с экспериментальными характеристиками ЦСС AD9911 (рис. 4).

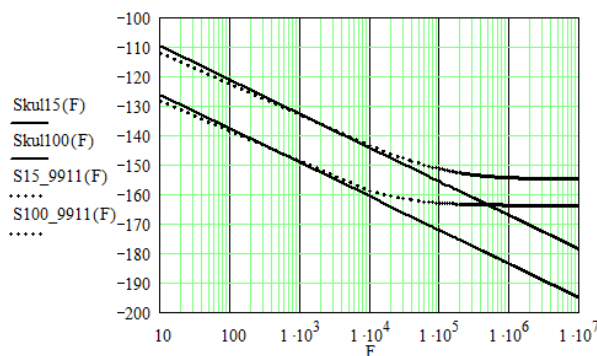


Рис. 4. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (точки), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (5) (сплошные прямые)

На основании исследования теоретических и экспериментальных исследований СПМ собственных шумов ЦСС в [2] также предлагается представить в следующем виде

$$S_{ЦСС} = \left(\frac{f_{out}}{f_T} \right)^2 \cdot \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3}, \quad (6)$$

где обозначены составляющие:

10^{k_4} - уровень первой естественной составляющей СПМ фазового шума, определяемой шумами генераторов тока и флуктуациями напряжения смещения ЦАП;

10^{k_3} - уровень второй естественной составляющей СПМ фазового шума, определяемой шумами нагрузки и не зависящей от синтезируемой частоты;

10^{k_1} - уровень составляющей фазового фликкер-шума;

10^{k_2} - уровень составляющей белого частотно-го шума.

Это соотношение справедливо для $K_{ЦСС} \leq 0,4$, когда можно не учитывать коэффициент передачи ЦАП

$$\left(\frac{\sin\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right)}{\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right)} \right)$$

и уменьшении вследствие этого амплитуды сигнала с увеличением синтезируемой частоты. При этом коэффициенты k_i рассчитываются по экспериментальным шумовым характеристикам ЦСС.

Выводы

Проведенный анализ показал, что СПМ в области фликкер-шумов наиболее точно можно аппроксимировать с помощью выражения (4), а в целом СПМ собственных шумов вычислительных ЦСС с помощью выражения (6). Таким образом, предложенные выражения аппроксимации СПМ собственных шумов ЦСС удобно применять для расчетов шумовых характеристик формирователей сигналов на основе вычислительных ЦСС.

Список литературы

1. Ромашова Л.В. Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. - №1.
2. Ромашова Л.В. Анализ шумов квантования цифровых вычислительных синтезаторов / Л.В. Ромашова // Перспективные технологии в средствах передачи информации. Материалы IX Международной научной конференции. – Владимир, 2011.
3. A. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices Inc. Available: <http://www.Analog.com>.
4. Jouko Vankka. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications: dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. – Helsinki University of Technology, 2000. – 208c.
5. Goldberg, Bar-Giora. Digital Frequency Synthesis Demystified DDS and Fractional – N PLLs. 1999 by LLH Technology Publishing.
6. Kuleshov V.N. 1/f Fluctuations Sources in Direct Digital Frequency Synthesizers and Their Contribution to the Output Oscillations Power Spectral Density / Kuleshov V.N. // Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium. – P. 282-287.

7. Kuleshov V.N. *Fundamental noise in direct digital frequency synthesizers* / Kuleshov V.N., Liu Y.H. // *Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium.* – P. 288-293.

8. Kroupa V.F. *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis* / V.F. Kroupa. - John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 320 c.

9. Kroupa V.F. *Discrete Spurious signals and Background Noise in Direct Digital Frequency Synthesizers* / V.F. Kroupa // *Proc. 1993 ITTT int. Freq. Control Symposium.* – P. 242-250.

10. Kroupa V.F. *Direct Digital Frequency Synthesizers* / V.F.Kroupa. - John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396c.

Поступила в редколлегию 12.03. 2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВЛАСНІ ФАЗОВІ ШУМИ ЦИФРОВИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ

М.П. Кандирін

Досліджено власні шуми цифрових обчислювальних синтезаторів сигналів. Проведено аналіз виразів для спектральної щільності потужності природних і фліккер-шумів.

Ключові слова: ЦСС, спектральна щільність потужності, фазові шуми.

OWN PHASE NOISE OF THE DIGITAL COMPUTER SYNTHESIS

N.P. Kandyrin

The self-noise of the direct digital synthesizers have been investigated. The analysis of the formulas for the spectral density of the power of the fundamental and flicker noise has been affected.

Keywords: DDS, power spectral density, phase noise.